

高速モーメント法を用いた大規模電磁界問題の数値解析法に関する研究

著者	今野 佳祐
号	56
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4591号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61792

氏 名	今 野 佳 祐
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成24年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	高速モーメント法を用いた大規模電磁界問題の 数値解析法に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 澤谷 邦男
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学教授 尾辻 泰一 東北大学教授 安藤 晃 東北大学准教授 陳 強

論 文 内 容 要 旨

モーメント法(Method of Moments, MoM)は, 導体やアンテナを数値解析するための強力な手法の1つであり, 近年は大規模な問題の解析を目的として高速なモーメント法に関する研究がいくつも行われてきた. モーメント法を高速化するための手段として, 周期性, 反復法と多重極展開, 直接法のいずれかを利用するということが考えられる.

本論文では, 周期性を利用した高速モーメント法としてインピーダンス拡張法(Impedance extension method, IEM)を提案し, 超大規模周期的アレーアンテナを数値解析する. そして, 破損素子を含む超大規模アレーアンテナを数値解析する手段として局所アドミタンス補償(Local admittance compensation, LAC)を提案し, IEM と組み合わせた IEM/LAC によってランダムな位置に破損素子を含む超大規模周期的アレーアンテナを数値解析し, 破損素子の分布とサイドローブレベルとの関係を統計的に明らかにする. 次に, 反復法と多重極展開に基づく高速モーメント法である CG-FMM(Conjugate gradient-fast multipole method)の計算コストを定量的に評価し, 解析モデルの形状と計算コストが密接に関わっていることを明らかにする. 最後に, 直接法に基づく高速モーメント法として CBFM(Characteristic basis function method)を取り上げ, 最小の計算時間を与えるブロック数及びそのときの最小計算時間を理論的に明らかにする. そして CBFM を誘電体近傍に配置したアンテナの数値解析にはじめて適用し, 精度を損なうことなく高速に数値解析ができるようなブロック分けを明らかにする.

第2章では, 周期性に基づく高速モーメント法である IEM/LAC を提案し, SSPS に用いられる電力伝送用超大規模アレーアンテナの特性を明らかにした. まず, IEM/LAC の提案に先立ち, 過去に明らかにされた周期的アレーアンテナにおける各素子の動作インピーダンスの性質をまとめた. 次に, 素子間相互結合やエッジ効果を考慮して超大規模な周期的アレーアンテナを数値解析できる新たな手法である IEM を提案した. 続いて, LAC を提案し, IEM と組み合わせることによって SSPS の運用中に生じた破損素子を含む超大規模アレーアンテナを数値解析できるようにした. そして, 数値解析により IEM/LAC の有効性を明らかにした後, LAC を適用する範囲であ

る Local array を最適化した。最後に、ランダムな位置に破損素子を含む 1 億素子の超大規模アレーアンテナを IEM/LAC によって数値解析し、破損素子及び素子間相互結合が動作利得やビーム方向に及ぼす影響を統計的に明らかにした。その結果、素子間相互結合の有無によってメインローブ・サイドローブレベル共に大きく変動することが分かった。また、メインローブレベルは破損素子数に比例してほぼ必ず減少するのに対し、サイドローブレベルは破損素子の分布によっては増加し得ることが分かった。破損素子によって、運用に支障をきたすほどメインローブの方向が大きくずれることはなかった。

第 3 章では、反復法に基づく高速モーメント法の 1 つである CG-FMM を取り上げ、解析モデルの形状と計算時間及び計算機メモリとの関係を明らかにした。まず、CG 法と FMM の原理について触れて定式化すると共に、解析に要する計算時間と計算機メモリを詳細にまとめた。次に、4 種類の標準的なワイヤグリッドモデルを CG-FMM によって数値解析し、妥当性を示した後、反復回数と \mathbf{Z} 行列の条件数との間にある関係を、解析モデルの形状や電氣的性質を踏まえて明らかにした。その結果、相互結合が強かったり電流の経路が 1 つしかないモデルなど、 \mathbf{Z} 行列の成分の 1 つ 1 つが電流ベクトルに大きな影響を及ぼす場合は、数値解析に要する反復回数が大きくなることが分かった。一方で、相互結合が弱いあるいは電流の経路が複数あるモデルなどは、 \mathbf{Z} 行列の成分の一部しか電流ベクトルに強く影響しないため、数値解析に要する反復回数が小さくなることが分かった。また、反復 1 回あたりの計算時間や必要な計算機メモリを明らかにし、解析モデルの形状との関係を示した。その結果、計算機メモリは解析モデルの形状によらずに削減が可能であることが分かった。その一方で、計算時間は解析モデルの形状に依存して削減の可否が決まり、1 次元形状のモデルでは計算時間の削減ができないことが分かった。

第 4 章では、直接法に基づく高速モーメント法の 1 つである CBFM を取り上げ、計算時間を最小にするブロック数を明らかにし、誘電体近傍アンテナを高精度かつ高速に解析するためのブロック分けも明らかにした。まず、CBFM の原理を示し、各ステップの計算時間を詳細にまとめた。次に、最小の計算時間を与えるようなブロック数を理論的に導出した。そして、3 種類の散乱問題を解析し、最小の計算時間を与えるブロック数及びそのときの最小計算時間が理論値と一致することを示した。そして、CG-FMM と CBFM 間で計算コストを比較し、解析モデルの形状や利用可能な計算機資源に応じて高速モーメント法を選択することの重要性を明らかにした。それから、誘電体近傍アンテナを解析するためのブロックモーメント法について詳説し、定式化を行った。続いて、CBFM とブロックモーメント法を組み合わせる誘電体近傍板状アンテナの解析を行った。その結果、全てのアンテナセグメントを同じブロックに配置し、同じブロックに近傍の分極電流も割り当てて解析を行うと高い精度で解が得られることが分かった。また、計算時間の都合で止むを得ずアンテナを分割する場合でも、給電方向を横断するようなブロック分けは解の精度を悪化させるので避けるべきだということも分かった。

本論文は、電磁界数値解析の分野における重要なテーマの 1 つである大規模問題の数値解析法に関して多くの新たな知見を与えるものである。本論文で得られた知見は、今後の電磁界数値解析の発展に寄与するだけでなく、様々な応用が期待できる。

論文審査結果の要旨

モーメント法はアンテナや散乱体からの放射・散乱電磁界の数値解析法として広く用いられている有効な手法である。しかしながら、未知の電流を N 個のセグメントに分割したとき、計算時間が N^3 に比例するため、波長に比べて大きな構造を対象とした大規模な散乱問題では計算量が膨大となり、しばしば計算できない場合が生じる。したがって、大規模な散乱問題の数値解析を行うためには、精度を保ちながら高速で計算できる高速モーメント法が重要になっている。著者は周期構造を有する超大規模アレーアンテナや、大規模非周期構造のアンテナ・散乱問題を対象として高速モーメント法に関する研究を行った。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は緒言である。

第 2 章では、超大規模周期構造アレーアンテナの解析法としてインピーダンス拡張法を提案している。この手法の有効性を示すために、1 億素子の宇宙太陽光利用システム (Space Solar Power Systems, SSPS) 用超大規模アレーアンテナを数値解析し、素子間相互結合がアンテナの動作利得に及ぼす影響を定量的に明らかにしている。また、このアレーアンテナ中に含まれる破損素子の影響を解析するために、局所アドミタンス補償法を提案している。これらの手法を組合せて、破損素子を含む 1 億素子の SSPS 用超大規模アレーアンテナの数値シミュレーションを行い、破損素子がアレーアンテナの利得とサイドローブレベルに与える影響を明らかにしている。従来のモーメント法を用いてこの問題を数値解析することは不可能であり、この成果は高く評価できる。

第 3 章では、代表的な高速モーメント法である Conjugate Gradient - Fast Multipole Method (CG-FMM) について、解析モデルと計算時間及び計算機メモリの関係を明らかにしている。典型的な 4 つの解析モデルを取り上げ、まず CG 法における反復回数が解析モデルに依存していることを明らかにしている。次に、これらのモデルについて計算時間を比較し、1 本の long dipole のような 1 次元構造のモデルでは高速化が困難であるが、2 次元散乱導体アレーのような 2 次元構造の場合は $N^{1.5}$ にまで計算時間を高速化できることを明らかにしている。また、必要な計算機メモリもモデルに依存するが、従来のモーメント法の N^2 から $N \sim N^{1.5}$ まで削減できることを示している。これまでは CG-FMM の計算コストについて明確な指針が示されていなかったもので、これらの成果は極めて有用である。

第 4 章では、もう 1 つの高速モーメント法である Characteristic Basis Function Method (CBFM) について、計算時間と解析モデルにおけるブロック数との関係を理論的に導出すると共に、数値解析によってこの理論式を実証している。また、CBFM を用いて誘電体近傍アンテナを数値解析し、高速でかつ高精度で解析するための解析モデルのブロック化手法を明らかにしている。さらに、第 3 章の CG-FMM の計算時間との比較により、数値計算を行う場合のメモリ容量低減化と計算の高速化・高精度化に対する指針を示している。

第 5 章は結言である。

以上要するに本論文は、超大規模周期構造のアレーアンテナの数値解析法を提案してその有効性を示すと共に、大規模非周期構造のアンテナや散乱体の電磁波放射・散乱問題に対する高速モーメント法の数値計算コストと解析モデルの関係を示すことにより、高速化のための指針を明らかにしたもので、無線通信工学並びに電気・通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。